睡眠对知觉与动作序列内隐学习离线巩固效应的影响

孙鹏 [1] 李雪晴 [2] 张庆云 [3] 尚怀乾 [3] 凌晓丽 [3]

([1] 山东财经大学大学生心理健康教育与研究中心，济南，250014)

([2] 北京理工大学人文与社会科学学院, 北京，100081)

([3] 山东师范大学心理学院，济南，250358)

摘 要 离线阶段发生的学习被称为离线巩固，即在最初获得知识之后，即使没有额外的练习，其记忆痕迹也会保持稳定或提高。有研究初步探究了睡眠对知觉和动作序列内隐学习离线巩固的影响，然而，这些研究未能实现知觉序列与动作序列的完全分离，序列类型是否调节睡眠对内隐序列学习离线巩固的影响仍需进一步探讨。此外，既往外显学习的研究发现相对于简单的序列，复杂的序列更容易从睡眠中获益，表现出基于睡眠的离线巩固效应。睡眠对知觉序列与动作序列内隐学习离线巩固的影响是否会受到序列复杂程度的调节尚不明确。为此，本研究在完全分离知觉序列和动作序列的情况下，通过三个实验操纵序列的长度及结构，设置三种不同复杂程度的序列规则，考察了这一问题。结果发现，对于动作序列，序列规则复杂程度较低时，无论是否经过睡眠都会发生离线巩固效应，而当动作序列规则较为复杂时，只有经历睡眠才会引起离线巩固效应；对于知觉序列，无论何种难易程度的规则，均未发生离线巩固效应。上述结果表明内隐序列知识基于睡眠的离线巩固会受到序列类型及序列复杂程度的调节，这为内隐学习的离线巩固争论提供了新的视角。

关键词 睡眠，内隐学习，知觉序列，动作序列，离线巩固

分类号 B842

1 引言

学习是人类非常重要的一种认知能力，其不仅可以在学习阶段，即在线阶段(online periods)发生，也可以在非学习阶段，即离线阶段(offline periods)发生。离线阶段发生的学习被称为离线巩固，指的是知识在最初获得之后，即使没有额外的练习，记忆痕迹也会保持稳定或提高的过程(Barham et al., 2021; Hallgató et al., 2013; Robertson, 2009; Simor et al., 2019; Song, 2009)。早在上个世纪末，Karni 等人就采用视觉纹理识别任务和手指敲击任务，分别证明了知觉和动作学习效应在一段时间的离线后会

收稿日期: 2021-11-23

* 国家自然科学基金青年项目(31800912)与教育部人文社会科学研究青年基金项目(18YJC190020)资助。

通信作者: 凌晓丽，E-mail: lingxiaoli@sdnu.edu.cn

得到提高(Karni et al., 1995; Karni et al., 1998; Karni & Sagi, 1993; Karni et al., 1994)。2004 年，Robertson 等人也通过序列反应时任务对该效应进行了探究，结果发现被试在经历 12 小时的离线阶段后，序列学习效应得到了提高。离线巩固是学习的一部分，它使得刚刚习得内容的记忆痕迹变得更为稳定，在帮助抵抗遗忘过程中的干扰因素时发挥着不可代替的作用，受到了研究者的广泛关注。目前，已有大量研究通过不同的实验范式验证了外显学习中离线巩固效应的存在(Brawn et al., 2010; Kempler & Richmond, 2012; Nettersheim et al., 2015; Sanchez-Mora & Tamayo, 2021; Song et al., 2007; Walker et al., 2003)。

然而，近几十年来许多研究发现学习并非一定是有意识的，也可以是在无意识条件下进行的内隐学习，它是有机体通过与环境接触，自动的、不易察觉的获得知识、规则的过程，在日常生活中，对适应环境和预知事件起着至关重要的作用(Reber, 1967; 郭秀艳, 2003; 郭秀艳 等, 2011; 郭秀艳, 杨治良, 2002)。内隐习得知识是否存在离线巩固效应以及该效应是否依靠睡眠一直是该领域的焦点研究问题(Cajochen et al., 2004; Kemeny & Lukacs, 2016; Nemeth et al., 2010; Robertson et al., 2004; Romano et al., 2010; Sanchez-Mora & Tamayo, 2021; Song et al., 2007; Spencer et al., 2007; Urbain et al., 2013)。目前，既往研究已经证实了内隐习得知识也存在离线巩固效应，但睡眠对内隐学习离线巩固的影响至今没有一致性的结论(Backhaus et al., 2016; Borragán et al., 2015; Ertelt et al., 2012; Hallgató et al., 2013; Meier & Cock, 2014; Nemeth et al., 2010; Robertson et al., 2004; Sanchez-Mora & Tamayo, 2021; Song et al., 2007; Spencer et al., 2006, 2007; Vakil et al., 2021)。在探究内隐学习离线巩固的研究中，研究者通常设置白天组和晚上组两种条件，并要求被试在第一阶段的学习任务结束之后，间隔白天或晚上的 12 个小时，完成第二阶段的任务(Hallgató et al., 2013; Nemeth et al., 2010; Robertson et al., 2004; Sanchez-Mora & Tamayo, 2021; Spencer et al., 2007; Vakil et al., 2021)。对于白天组，要求被试保持清醒状态，晚上组则正常睡眠。一些研究发现内隐知识的习得存在基于睡眠的离线巩固效应，具体表现为在睡眠状态下存在更大的离线巩固效应(Ertelt et al., 2012; Spencer et al., 2007)；另一些研究则发现睡眠和清醒状态下，内隐学习存在类似的离线巩固效应(Borragán et al., 2015; Nemeth et al., 2010)。

纵观既往探讨内隐学习离线巩固效应的研究，大多采用了经典的序列反应时任务(serial reaction time, SRT)(Nissen & Bullemer, 1987)，该任务存在的一个问题在于刺激呈现的顺序和手指按键顺序是一一对应的，两者混合在一起，因此无法确定被试内隐习得的究竟是刺激呈现的顺序(知觉学习)还是手指按键的顺序(动作学习)，也就无法确切厘清睡眠对内隐学习离线巩固效应的影响作用。既往外显序列学习领域的研究已揭示出知觉信息与动作信息在离线巩固上存在差异，表现为知觉信息表征的巩固与睡眠有关，而动作信息表征的巩固与睡眠或觉醒无关(Albouy et al., 2015; Albouy et al., 2013; Witt

et al., 2010)。且脑成像的研究也进一步发现两种信息表征在神经层面存在差异：知觉信息表征和动作信息表征分别依赖于海马皮层网络(hippocampo-cortical networks)和纹状体皮层网络(striato-cortical networks)；研究还发现海马的活动与基于睡眠的离线巩固有关，而纹状体在离线巩固过程中的作用并未受到睡眠与否的调节(Albouy et al., 2015; Peigneux et al., 2004)。这些研究在一定程度上为序列类型可能调节睡眠对内隐序列学习离线巩固的影响提供了支持。

有鉴于此，一些研究者尝试在分离知觉序列和动作序列的前提下，考察睡眠对两种序列内隐学习离线巩固的影响。Hallgató等人(2013)采用改进的概率序列反应时任务尝试分离动作序列与知觉序列，结果发现相对于知觉组，动作组有更好的离线巩固效应，但是睡眠对两者的离线巩固均没有促进作用。Pace-Schott 与 Spencer(2013)采用类似的实验范式则发现，睡眠在知觉和动作序列的离线巩固中有着不同的作用，睡眠促进了年轻人对知觉序列的离线巩固，但对于动作序列，睡眠并没有表现出离线巩固的优势。但值得注意的是，在上述研究中，知觉序列与动作序列并未完全分离。例如，在 Hallgató等人(2013)的实验中，研究者创设了一个关于赛车的情境，用屏幕中上、下、左、右四个指向的箭头代表汽车行驶的方向，每个方向分别与其同向的按键一一对应。被试需要又准又快的按键，以让汽车快速按箭头指向行驶。被试所不知道的是，汽车行驶的方向是按照某一顺序呈现的。该任务包括两个阶段：第一个阶段，告知被试汽车发生了车祸，方向盘失灵，若要按箭头的方向行驶，须将箭头顺时针旋转 90 度，并按下与这个旋转箭头对应的键；第二阶段，被试被随机分到知觉组或动作组，并被告知汽车方向盘已经被修好，因此按与箭头方向对应的键即可。在知觉条件下，知觉序列(屏幕上显示的刺激顺序)与第一阶段是相同的，但动作序列(按键)与第一阶段相比逆时针旋转了 90 度；在动作条件下，动作序列的顺序与第一阶段是相同的，但知觉序列相对于第一阶段顺时针旋转了 90 度。在该范式中，尽管知觉组中第二阶段的按键序列虽发生了变化，但它本身仍遵循一定的规则，由此产生了一个新的动作序列，且与知觉序列存在一定的对应关系；同样在动作组中也产生了一个新的刺激呈现序列，并与动作序列存在一定的对应关系，所以该范式实际并未能完全分离知觉序列和动作序列。

2011 年，Rose 等人在探讨纯粹的知觉和动作序列能否被内隐习得的研究中，采用的改进的序列反应时任务则较好的分离了知觉序列和动作序列。在该任务中，屏幕上会呈现一个目标色块与 6 个周围色块(例如，红，绿，玫红，黑，黄，蓝)。每个周围色块的位置与键盘上的按键一一对应，要求被试判断目标色块与周围哪个色块颜色一致并又快又准地进行按键。知觉组目标色块的颜色遵循某一固定序列(如：黄，黑，绿，红，玫红，蓝)，但对应的手指按键序列是随机的；动作组手指按键的顺序遵循某一规律(如：k，j，d，s，l，f)，但目标色块的颜色是随机的。因此，可以较好的分离知觉序列和动作序列。Rose 等人的结果发现，不管是知觉序列还是动作序列均可以被内隐习得。近期采用类似

实验范式探讨纯粹的动作序列的研究，也发现了纯粹的动作序列可以被内隐习得(Deroost & Coomans, 2018; Ferdinand & Kray, 2017)。鉴于此，本研究将采用 Rose 等人(2011)改进的序列反应时任务，在完全分离知觉序列和动作序列的情况下，考察睡眠对纯粹的知觉和动作序列内隐习得离线巩固的影响。

此外，既往外显学习的研究发现相对于长度较短、结构简单的序列，序列较长、结构复杂的序列更容易从睡眠中获益，表现出基于睡眠的离线巩固效应(Blischke & Malangré, 2016, 2017; Genzel et al., 2012; Malangré & Blischke, 2016; Malangré et al., 2014)。例如，在 Blischke 与 Malangré(2017)的研究中，其采用一个大动作任务(gross motor tasks)考察了动作序列的长度与结构复杂程度对动作序列学习离线巩固的影响。在该研究中，被试需要根据屏幕上的提示将一个小木栓插到木板上的指定位置，所插位置遵循某一特定的序列。结果发现，当序列较长且结构复杂程度高(例如，2-19-15-2-3-13-19-7-11-9-14)时，被试在经过睡眠之后，序列的执行时间显著降低，而经历相同时间的清醒状态则没有表现出执行时间下降。当序列长度较短(例如，3-13-19-7-11-9)或序列结构遵循某一常规的移动模式(比如：X 形状或矩形)时，则没有表现出基于睡眠的离线巩固效应。那么，睡眠对内隐习得知识的离线巩固是否也受到序列复杂程度的影响？这一问题也尚待进一步探索。

综上所述，本研究将采用 Rose 等人(2011)改进的序列反应时任务，在完全分离知觉序列和动作序列的情况下，通过三个实验设置不同复杂程度的序列规则以及 12 小时的离线时间(白天组 vs. 晚上组)，考察睡眠对纯粹的知觉和动作序列内隐习得离线巩固的影响。对于该问题的解决，将有助于探明内隐习得知识的离线巩固是否存在基于睡眠的优势效应，以及知觉与动作序列内隐知识的离线巩固过程是否存在分离，并为内隐序列学习中的动作与知觉之争，提供进一步的实证依据。

2 实验一

2.1 方法

2.1.1 被试

以往相关的研究采用的被试量为每组 15 人到 17 人(Hallgató et al., 2013; Lutz et al., 2018)，此外参考之前的相关研究(Lutz et al., 2018)，采用 G*Power 3.1 软件，设置统计检验力为 0.90，α 水平为 0.05，效应量 f 为 0.44，计算所需要被试样本量为 57 人，每组平均 15 人。招募 88 名在校大学生参加了实验(66 名女性，19.10 ± 0.97 岁)，并将他们随机分到知觉晚上组、知觉白天组、动作晚上组、动作白天组。其中知觉晚上组 21 人(17 名女性)，知觉白天组 21 人(16 名女性)，动作晚上组 23 人(17 名女性)，动作白天组 23 人(16 名女性)。所有被试智力正常，均为右利手，无色盲色弱，视力或矫正视力正常。9 名被试的数据在后续统计被剔除，其中 7 名被试报告发现全部或部分序列规则(动作晚上组 4 人，动作白

天组 3 人)，2 名知觉晚上组被试对其睡眠质量的评分过低(低于 4 分)。所有被试均自愿参加，在实验开始之前签署知情同意书，实验结束之后给予一定的报酬。本实验已经过山东师范大学伦理委员会批准。

2.1.2 实验设计

本实验采用 2(序列：知觉序列和动作序列) × 2(睡眠：有和无)被试间实验设计。因变量为序列反应时任务的错误率和反应时以及预测任务的信心值。

2.1.3 实验程序

实验分为两部分：序列反应时任务和预测任务。

序列反应时任务采用 Rose 等人(2011)改进的序列反应时任务。在实验过程中，屏幕上呈现 6 个周围色块(蓝，黄，黑，绿，红，玫红)和一个目标色块，每个周围色块的位置对应一个按键(从左往右依次是：s，d，f，j，k，l，要求被试判断目标色块与周围哪个色块颜色一致并又快又准地进行按键反应。对于知觉序列组，目标色块的颜色遵循某一固定序列(如：蓝，黄，黑，绿，红，玫红)，但周围色块的颜色是随机分配的，因此，对应的手指按键序列也是随机的；对于动作组，手指按键顺序遵循某一序列(如：s，l，f，k，j，d)，但目标色块的颜色是随机的(见图 1A)。实验之前被试并不知道序列规则的存在。在每个试次中，每组色块最多呈现 2000 毫秒，按键之后色块消失，300 毫秒后呈现下一组色块。正式实验包括两个阶段。第一个阶段由 16 个组块(Block)组成：其中 12 个是序列组块(Sequential block)，4 个是随机组块(Random block, 分别为第 3、7、11、15 组块)；第二个阶段由 4 个组块组成，其中第 3 个为随机组块。每个组块均包含 72 个试次且组块之间有 10 秒的休息时间。第一阶段结束后间隔 12 小时再进行第二阶段，对于晚上组，第一阶段在晚上 7 点至 9 点进行，第二阶段在第二天早上 7 点至 9 点进行；对于白天组则相反，第一阶段在早上 7 点至 9 点进行，第二阶段在当天晚上 7 点至 9 点进行(见图 1B)。为了保证实验的严谨性，我们分别设计了两个知觉序列(“蓝，黄，黑，绿，红，玫红”和“黑，蓝，绿，玫红，黄，红”)和两个动作序列(“s，l，f，k，j，d”和“l，k，f，s，j，d”)。两个知觉序列和动作序列分别在被试间平衡。在正式实验之前进行练习实验，以确保被试熟悉实验流程。

序列反应时任务结束后，询问被试是否感受到或发现材料中存在某种规则，若被试报告发现规则，则要求其把规则写下来。随后采用预测任务来评估被试可能的外显知识数量。在预测任务中，首先给被试呈现观察刺激(6 个周围色块和目标色块)2000 毫秒，要求被试进行观察但不反应，300 毫秒后呈现预测刺激(6 个周围色块和问号)，要求被试预测此时目标色块的颜色并进行相应的按键反应，预测刺激最多呈现 2000 毫秒，被试按键之后刺激消失。随后，被试需对他们的选择进行信心值评分(50%～

100%，50%表示完全猜测，100%表示绝对确定，被试可以输入 50%～100%之间的任何一个数字)(Dienes & Seth, 2010; Guo et al., 2013; Li et al., 2013; Mealor & Dienes, 2012)。该任务共包括 24 个试次，使用与序列反应时任务中相同的序列规则，并把该序列间断开，其中每种间断呈现 4 次(Rose et al., 2011)。

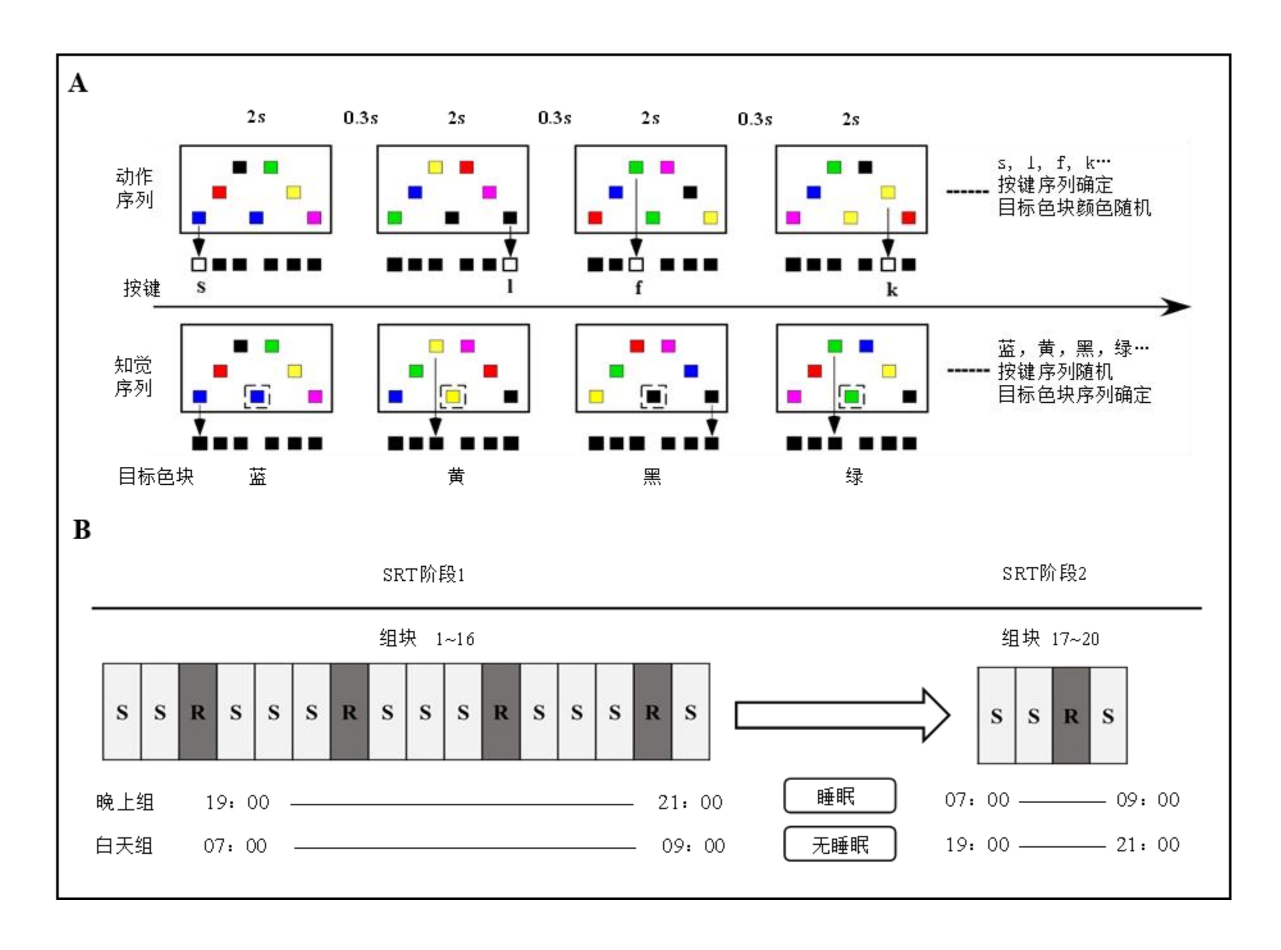


图 1 A 是实验一序列反应时任务(SRT)示意图； B 是序列反应时任务流程图。“SRT 阶段 1”在离线阶段之前进行，“SRT 阶段 2”在离线阶段之后进行。S 指序列组块，R 指随机组块。

为了测量被试的睡眠时间和睡眠质量(晚上组：当晚的睡眠，白天组：前一晚的睡眠)，参考 Song 等人(2007)的研究，在整个实验结束之后，让被试完成匹兹堡睡眠品质问卷(Pittsburgh Sleep Quality Index， PQSI)(Buysse et al., 1989)以及清晨型和夜晚型问卷自评量表(Morningness–Eveningness Questionnaire, MEQ)(Horne & Ostberg, 1976)，此外，询问被试的睡眠时间并让他们对自己的睡眠质量进行 1～10 评分(Song et al., 2007)，分值越高睡眠质量越好。白天组被试被要求白天不要小睡，但对白天的活动没有进行限制。

2.2 结果

2.2.1 睡眠状况

对知觉晚上组、知觉白天组、动作晚上组与动作白天组被试的睡眠时间、自评睡眠质量分数、PSQI 分数以及 MEQ 分数分别进行 2 × 2 的方差分析，发现均没有显著性差异($ps > 0.05$)，四组被试的具体数据见表 1。

表 1 四组被试的睡眠状况($M \pm SD$)

组别	睡眠时间	自评分数(1～10 评分)	PSQI	MEQ
知觉晚上组	6.89 ± 0.97	7.53 ± 1.71	5.79 ± 3.10	48.74 ± 6.94
动作晚上组	7.18 ± 0.77	8.37 ± 1.50	4.79 ± 2.20	51.42 ± 7.60
知觉白天组	7.13 ± 1.13	7.62 ± 1.32	5.62 ± 1.91	50.14 ± 3.84
动作白天组	7.54 ± 1.03	7.95 ± 0.94	5.80 ± 2.26	52.75 ± 6.05

注：PQSI 为匹兹堡睡眠品质问卷，MEQ 为清晨型和夜晚型问卷自评量表。

2.2.2 内隐序列的序列学习效应

在序列反应时任务中，因各组的错误率比较低：知觉晚上组($M = 0.04$，$SD = 0.02$)，知觉白天组($M = 0.05$，$SD = 0.02$)，动作晚上组($M = 0.03$，$SD = 0.02$)，动作白天组($M = 0.04$，$SD = 0.02$)，因此在后面的数据分析中不再分析错误率，主要分析反应时。

参考 Ling 等人(2015)以及 Hallgató等人(2013)的研究，序列学习效应(Sequence Learning Effect，SLE)计算方式如下：用随机序列组块的反应时减相邻两个序列组块的平均反应时，即第一阶段序列学习效应 = 组块 15 − (组块 14 + 组块 16) / 2。将各组的序列学习效应进行单样本 t 检验，结果发现：知觉晚上组($t(18) = 2.48$，$p = 0.023$，Cohen’s $d = 0.57$)、知觉白天组($t(20) = 2.37$，$p = 0.028$，Cohen’s $d = 0.52$)、动作晚上组($t(18) = 6.71$，$p < 0.001$，Cohen’s $d = 1.54$)、动作白天组($t(19) = 5.87$，$p < 0.001$，Cohen’s $d = 1.31$)的序列学习效应均显著高于 0，表明四组被试均习得了序列知识(见图 2A)。

对各组第一阶段的序列学习效应进行 2(序列：知觉序列和动作序列) × 2(睡眠：有和无)被试间方差分析，结果发现，序列主效应显著($F(1, 75) = 49.06$，$p < 0.001$，$\eta_p^2 = 0.40$)，动作序列的序列学习效应显著高于知觉序列；睡眠主效应不显著($F(1, 75) = 0.31$，$p = 0.581$)；序列与睡眠的交互作用不显著($F(1, 75) = 0.70$，$p = 0.404$)。

2.2.3 离线巩固效应

参考 Ling 等人(2015)以及 Hallgató等人(2013)的研究，序列学习效应计算方式如下：用随机序列组块的反应时减相邻两个序列组块的平均反应时，即第二阶段序列学习效应=组块 19 − (组块 18 + 组

块 20) / 2；离线巩固效应等于第二阶段的序列学习效应减去第一阶段的序列学习效应。将各组第二阶段的序列学习效应进行单样本 t 检验，发现动作晚上组($t(18) = 6.37$，$p < 0.001$，Cohen's $d = 1.46$)和动作白天组($t(19) = 9.95$，$p < 0.001$，Cohen's $d = 2.22$)的序列学习效应均显著高于 0；知觉晚上组($t(18) = 1.44$，$p = 0.168$)和知觉白天组($t(20) = 0.24$，$p = 0.812$)的序列学习效应均与 0 没有显著性差异(见图 2B)。

将各组的离线巩固效应进行单样本 t 检验，动作晚上组($t(18) = 2.76$，$p = 0.013$，Cohen's $d = 0.63$)、动作白天组($t(19) = 2.31$，$p = 0.032$，Cohen's $d = 0.51$)的离线巩固效应显著高于 0；知觉晚上组($t(18) = -0.88$，$p = 0.391$)和知觉白天组($t(20) = -1.69$，$p = 0.107$)的离线巩固效应均与 0 没有显著性差异(见图 2C)。对离线巩固效应进行 2(序列：知觉序列和动作序列) × 2(睡眠：有和无)的被试间方差分析，结果发现，序列主效应显著($F(1, 75) = 16.47$，$p < 0.001$，$\eta_p^2 = 0.18$)，动作组离线巩固效果好于知觉组；睡眠主效应不显著($F(1, 75) = 0.58$，$p = 0.448$)；序列和睡眠交互作用不显著($F(1, 75) = 0.001$，$p = 0.981$)。

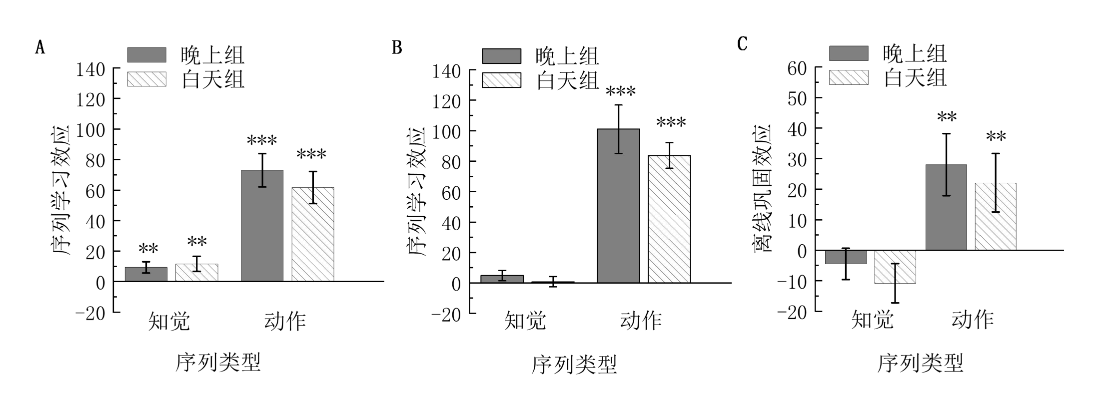


图 2 A 是第一阶段的序列学习效应；B 是第二阶段的序列学习效应；C 是离线巩固效应。误差线代表均值的标准误。**表示 $p < 0.05$，***表示 $p < 0.001$，下同。

2.2.4 意识性评估

Dienes 等人提出(Dienes et al., 1995; Dienes & Berry, 1997; Dienes & Perner, 1999)采用零相关标准(zero-correlation criterion)来考察被试习得知识的意识性状态，该方法已被广泛证明能够准确的确定外显知识是否存在(Guo et al., 2013; 李菲菲, 2013)。具体来说，被试在每次做出预测判断后进行信心值评估，如果习得的知识是无意识的，那么他们即使能做出正确的判断，也并不能区分知道和猜测状态，即被试判断正确率与信心值之间不相关。

参考姜珊(2012)的研究，本研究通过区分被试判断正确和错误的试次，评估两类试次间被试信心值的关系，进一步检验被试的知识意识性状态。14 名被试由于判断全错在后续统计中被剔除(知觉晚上组 3 人，动作晚上组 9 人，动作白天组 2 人)。结果发现，对于知觉晚上组($t(15) = -0.63$，$p = 0.540$)、动作晚上组($t(9) = -1.77$，$p = 0.111$)和动作白天组($t(17) = -0.79$，$p = 0.439$)，两类试次之间信心值均

差异不显著，表明被试的知识是内隐的。知觉白天组两类试次间信心值差异显著($t(20) = -2.36$，$p = 0.029$，Cohen's $d = 0.51$)，表现为被试判断错误的试次信心值显著高于判断正确的试次，也说明被试的知识是无意识的。此外，剔除的 14 名被试正确率为 0，也表明他们并不存在外显知识。

2.3 讨论

实验一采用 Rose 等人(2011)改进的序列反应时任务，在完全分离知觉序列和动作序列的情况下，考察了睡眠对纯粹的知觉序列和动作序列内隐习得离线巩固的影响。结果发现相对于知觉序列，动作序列表现出更强的离线巩固效应，但睡眠对知觉序列和动作序列的离线巩固均没有促进作用。

既往外显学习的研究发现基于睡眠的离线巩固只是发生在结构比较复杂的动作序列学习中，并未在出现在结构简单序列的学习中(Blischke & Malangré, 2016, 2017; Genzel et al., 2012; Malangré et al., 2014)。在内隐学习领域，基于睡眠的离线巩固效应是否也受到序列复杂程度的影响？鉴于此，在实验二中将采用更为复杂的序列规则考察睡眠对纯粹的知觉序列和动作序列内隐习得离线巩固的影响。

3 实验二

3.1 方法

3.1.1 被试

实验二样本量的选择方式与实验一相同。招募 81 名在校大学生参加了实验(60 名女性，20.01 ± 1.93 岁)，并随机分到知觉晚上组、知觉白天组、动作晚上组、动作白天组。其中知觉晚上组 20 人(13 名女性)，知觉白天组 20 人(14 名女性)，动作晚上组 20 人(16 名女性)，动作白天组 21 人(17 名女性)。所有被试智力正常，均为右利手，无色盲色弱，视力或矫正视力正常。其中 6 名被试因发现部分规则或全部规则在后续统计中被剔除(动作晚上组 3 名与动作白天组 3 名)。所有被试均自愿参加，在实验开始之前签署知情同意书，实验结束之后给予一定的报酬。本实验已经过山东师范大学伦理委员会批准。

3.1.2 实验设计

同实验一，本实验采用 2(序列：知觉序列和动作序列) × 2(睡眠：有和无)的被试间实验设计。因变量为序列反应时任务的错误率和反应时以及预测任务的信心值。

3.1.3 实验程序

同实验一，实验二也包括序列反应时任务和预测任务。与实验一不同的是，在本实验的序列反应时任务中采用了 2 个复杂程度更高的知觉序列(“红，绿，黑，黄，蓝，玫红，绿，黄，黑，玫红，蓝”和“蓝，红，玫红，绿，蓝，黑，红，黑，绿，黄，玫红”)和 2 个复杂程度更高的动作序列 (“d，j，f，

k，s，l，j，k，f，l，s”和“s，d，l，j，s，f，d，f，j，k，l”)。

3.2 结果

3.2.1 睡眠状况

对知觉晚上组、动作晚上组、知觉白天组与动作白天组被试睡眠时间、自评睡眠质量分数、PSQI 分数以及 MEQ 分数进行 2 × 2 的方差分析，均没有显著差异($ps > 0.05$)，四组被试的具体数据见表 2。

表 2 四组被试的睡眠状况($M \pm SD$)

组别	睡眠时间	自评分数(1～10 评分)	PSQI	MEQ
知觉晚上组	6.97 ± 0.72	7.85 ± 1.27	5.90 ± 1.80	49.90 ± 8.96
动作晚上组	7.03 ± 0.60	7.88 ± 1.69	4.71 ± 2.08	53.53 ± 9.18
知觉白天组	6.77 ± 0.83	7.30 ± 1.72	5.35 ± 1.90	46.55 ± 9.94
动作白天组	7.22 ± 0.73	7.72 ± 1.41	5.00 ± 2.70	49.67 ± 5.29

注：PQSI 为匹兹堡睡眠品质问卷，MEQ 为清晨型和夜晚型问卷自评量表。

3.2.2 内隐序列的序列学习效应

在序列反应时任务中，因各组的错误率比较低：知觉晚上组($M = 0.04$，$SD = 0.02$)；知觉白天组($M = 0.04$，$SD = 0.03$)；动作晚上组($M = 0.04$，$SD = 0.02$)；动作白天组($M = 0.04$，$SD = 0.03$)，因此在后面的数据分析中不再分析错误率，主要分析反应时。

同实验一，参考 Ling 等人(2015)以及 Hallgató等人(2013)的研究，序列学习效应计算方式如下：用随机序列组块的反应时减相邻两个序列组块的平均反应时，即第一阶段序列学习效应 = 组块 15 − (组块 14 + 组块 16) / 2。将各组的序列学习效应进行单样本 t 检验，结果发现：第一阶段序列学习效应：动作晚上组($t(16) = 4.80$，$p < 0.001$，Cohen’s $d = 1.17$)和动作白天组($t(17) = 6.27$，$p < 0.001$，Cohen’s $d = 1.48$)的序列学习效应显著高于 0，说明被试均习得序列知识；知觉晚上组($t(19) = 1.92$，$p = 0.070$)与知觉白天组($t(19) = 0.90$，$p = 0.377$)第一阶段序列学习效应均与 0 无显著差异(见图 3A)。

对各组第一阶段的序列学习效应进行 2 (序列：知觉序列和动作序列) × 2 (睡眠：有和无)被试间方差分析，结果发现，序列主效应显著($F(1, 71) = 23.47$，$p < 0.001$，$\eta_p^2 = 0.25$)，动作序列的序列学习效应显著高于知觉序列；睡眠主效应不显著($F(1, 71) = 0.01$，$p = 0.915$)；序列与睡眠的交互作用不显著($F(1, 71) = 0.41$，$p = 0.522$)。

3.2.3 离线巩固效应

同实验一，参考 Ling 等人(2015)以及 Hallgató等人(2013)的研究，序列学习效应计算方式如下：用随机序列组块的反应时减相邻两个序列组块的平均反应时，即第二阶段序列学习效应 = 组块 19 −

(组块 18 + 组块 20) / 2；离线巩固效应等于第二阶段的序列学习效应减去第一阶段的序列学习效应。将各组的第二阶段的序列学习效应进行单样本 *t* 检验，发现动作晚上组($t(16) = 8.21$，$p < 0.001$，Cohen's $d = 1.99$)和动作白天组($t(17) = 6.49$，$p < 0.001$，Cohen's $d = 1.53$)的序列学习效应均显著高于 0；知觉晚上组($t(19) = 0.70$，$p = 0.491$)和知觉白天组($t(19) = 0.89$，$p = 0.385$)的序列学习效应均与 0 无显著差异(见图 3B)。

对各组的离线巩固效应进行单样本 *t* 检验，动作晚上组($t(16) = 4.37$，$p < 0.001$，Cohen's $d = 1.06$)的序列学习效应显著高于 0；动作白天组($t(17) = -1.50$，$p = 0.153$)、知觉晚上组($t(19) = -1.16$，$p = 0.261$)与知觉白天组($t(19) = -0.02$，$p = 0.987$)的离线巩固效应均与 0 无显著差异(见图 3C)。对离线巩固效应进行 2(序列：知觉序列和动作序列) × 2(睡眠：有和无)的被试间方差分析，序列主效应不显著($F(1, 71) = 3.13$，$p = 0.081$)；睡眠主效应显著($F(1, 71) = 4.50$，$p = 0.037$，$\eta_p^2 = 0.06$)；序列与睡眠的交互作用显著($F(1, 71) = 9.20$，$p = 0.003$，$\eta_p^2 = 0.12$)。对交互作用进行简单效应分析发现，对于知觉序列，晚上组和白天组的离线巩固效应没有显著性差异($F(1, 71) = 0.44$，$p = 0.507$)；而对于动作序列，晚上组的离线巩固效应显著高于白天组($F(1, 71) = 12.45$，$p = 0.001$，$\eta_p^2 = 0.15$)。当有睡眠时，动作组显著高于知觉组($F(1, 71) = 11.35$，$p = 0.001$，$\eta_p^2 = 0.14$)；当无睡眠时，知觉组和动作组没有显著性差异($F(1, 71) = 0.81$，$p = 371$)。

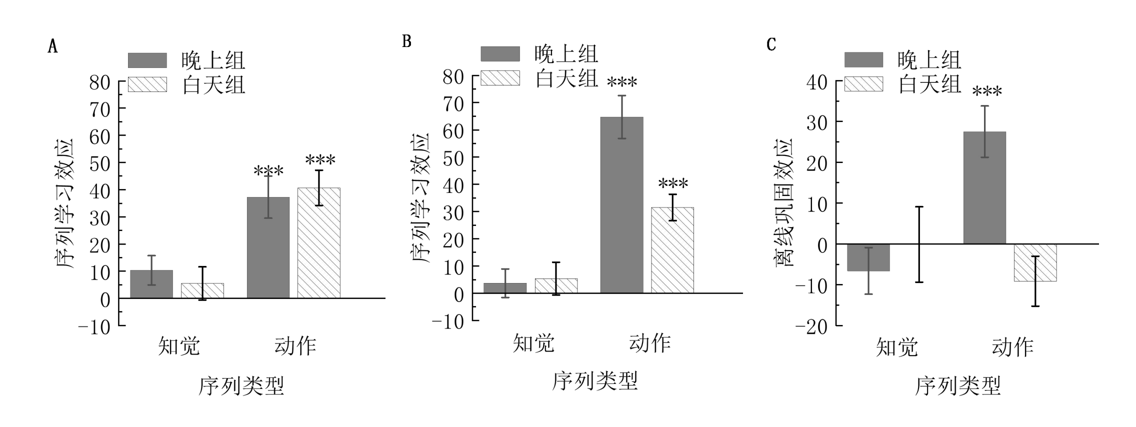


图 3 A 是第一阶段的序列学习效应；B 是第二阶段的序列学习效应；C 是离线巩固效应。误差线代表均值的标准误。

3.2.4 意识性评估

同实验一，采用零相关标准进一步检验被试的知识意识性状态。结果发现，四组被试在判断正确和错误的试次上，信心值差异均不显著(知觉晚上组：$t(19) = -0.13$，$p = 0.897$；知觉白天组：$t(19) = -0.45$，$p = 0.658$；动作晚上组：$t(16) = 1.28$，$p = 0.218$；动作白天组：$t(17) = 0.78$，$p = 0.447$)，表明

被试习得的序列知识是内隐的。

3.3 讨论

实验二在实验一的基础上采用了更加复杂（序列长度为 11）的序列规则，在完全分离知觉序列和动作序列的情况下，进一步考察了睡眠对纯粹的知觉序列和动作序列内隐习得离线巩固的影响。结果发现，被试可以内隐习得动作序列，而且相对于白天组，动作序列晚上组被试表现出更强的离线巩固效应；但对于知觉序列，被试既没有内隐习得也没有表现出任何离线巩固效应。

在实验一中，采用长度为 6 的序列规则，结果发现纯粹的知觉和动作序列知识均可被内隐习得，且相对于知觉序列知识，被试习得更多的动作序列知识，这与 Rose 等人(2011)以及 Deroost 和 Soetens (2006)的研究结果一致。在实验二中，采用长度为 11 的序列规则，结果发现被试只能习得动作序列。既往一些研究发现知觉序列学习仅发生在序列结构相对简单的情况下，对于在复杂序列结构的情况下，知觉学习是不存在的，或者是微弱存在的(Deroost & Soetens, 2006; Kempler & Richmond, 2012; Remillard, 2003)。因此在实验一与实验二中知觉序列知识的弱化可能与知觉序列结构的复杂性有关。

此外，实验一与实验二均发现动作组存在离线巩固效应，而知觉组不存在离线巩固效应。Kemeny 和 Lukacs(2016)认为学习的效果会影响离线巩固效应，即学习效果越小，离线巩固效应越小。在实验一中，知觉组第一阶段的序列学习效应较小(11ms)且显著低于动作组(67ms)。因此，知觉组不存在离线巩固可能与知觉序列的序列学习效应过小有关。鉴于此，在实验三中，我们将进一步降低知觉序列的复杂性来提高序列学习效应，从而进一步探讨纯粹知觉序列的离线巩固效应。

4 实验三

4.1 方法

4.1.1 被试

以往相关的研究采用的被试量为每组 15 人到 20 人(Lutz et al., 2018; Meier & Cock, 2014)，此外参考之前的相关研究(Lutz et al., 2018)中睡眠效果差异的效果量(Cohen's d = 1.16)，采用 G*Power 3.1 软件，设置统计检验力为 0.90，α 水平为 0.05，计算需要被试样本量为每组 17 人。招募 46 名在校大学生参加了实验(39 名女性，19.33 ± 1.30 岁)，并随机分到晚上组、白天组。其中晚上组 23 人(21 名女性)，白天组 23 人(18 名女性)。所有被试智力正常，均为右利手，无色盲色弱，视力或矫正视力正常。4 名白天组被试的数据在后续统计中被剔除，其中 2 名被试因未能按照指导语完成实验，1 名被试实验过程中睡着，另外 1 名被试实验过程中程序出问题等原因。所有被试均自愿参加，在实验开始之前签署知情同意书，实验结束之后给予一定的报酬。本实验已经过山东师范大学伦理委员会批准。

4.1.2 实验设计

本实验采用单因素被试间设计。自变量为组别，包括晚上组与白天组。因变量为序列反应时任务的错误率和反应时以及预测任务的信心值。

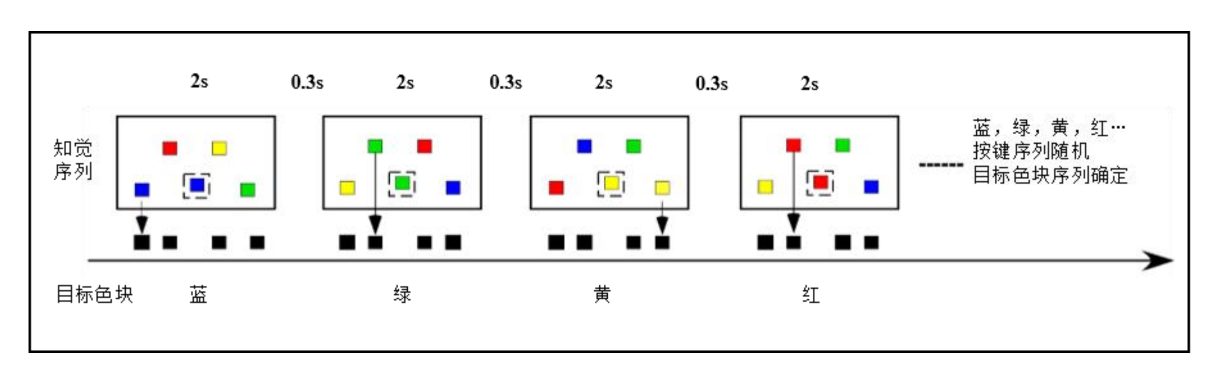


图 4 实验三序列反应时任务示意图。

4.1.3 实验程序

同实验一、二，实验三也包括序列反应时任务和预测任务。与实验一、二不同的是，在序列反应时任务中，屏幕上只呈现 4 个周围色块(黄，绿，红，蓝)和一个目标色块(见图 4)。每个周围色块的位置与键盘上的按键(从左往右依次是：d，f，j，k)一一对应。另外，在本实验中只有知觉序列组，无动作序列组。知觉序列包括两种("红，蓝，绿，黄"和"绿，蓝，红，黄")，并在被试间平衡。

4.2 结果

4.2.1 睡眠状况

对晚上组，白天组被试的睡眠时间、自评睡眠质量分数、PSQI 分数以及 MEQ 分数进行独立样本 t 检验，均没有显著性差异($ps > 0.05$)，两组被试的具体数据见表 3。

表 3 晚上组和白天组被试的睡眠状况($M \pm SD$)

组别	睡眠时间	自评分数(1～10 评分)	PSQI	MEQ
晚上组	7.54 ± 0.67	7.80 ± 0.89	5.83 ± 2.55	49.96 ± 8.06
白天组	7.08 ± 1.03	7.13 ± 1.90	6.26 ± 2.90	50.79 ± 9.20

注：PQSI 为匹兹堡睡眠品质问卷，MEQ 为清晨型和夜晚型问卷自评量表。

4.2.2 内隐序列的序列学习效应

在序列反应时任务中，因各组的错误率比较低：晚上组($M = 0.04$，$SD = 0.02$)；白天组($M = 0.04$，$SD = 0.03$)，因此在后面的数据分析中不再分析错误率，主要分析反应时。

同实验一、二，第一阶段序列学习效应 = 组块 15 – (组块 14 + 组块 16) / 2。将两组被试第一阶段

的序列学习效应分别进行单样本 t 检验，结果发现：晚上组($t(22) = 4.73$，$p < 0.001$，Cohen's $d = 0.99$)、白天组($t(18) = 6.11$，$p < 0.001$，Cohen's $d = 1.40$)的序列学习效应均显著高于 0(见图 5)，说明被试均习得序列知识。对两组被试第一阶段的序列学习效应进行独立样本 t 检验，结果发现，两组被试第一阶段的序列学习效应无显著差异($t(40) = 0.57$，$p = 0.570$)。

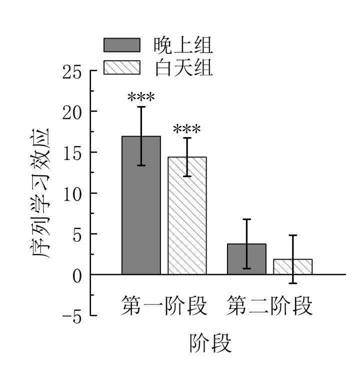


图 5 序列学习效应。误差线代表均值的标准误。

4.2.3 离线巩固效应

同实验一、二，第二阶段序列学习效应 = 组块 19 – (组块 18 + 组块 20) / 2；离线巩固效应等于第二阶段的序列学习效应减去第一阶段的序列学习效应。将两组被试第二阶段的序列学习效应分别进行单样本 t 检验(见图 5)，结果发现两组被试的序列学习效应均与 0 均无显著差异(晚上组：$t(22) = 1.25$，$p = 0.226$；白天组：$t(18) = 0.63$，$p = 0.535$)。

分别对两组被试的离线巩固效应进行单样本 t 检验，结果发现：发现晚上组($t(22) = -2.73$，$p = 0.012$，Cohen's $d = 0.57$)和白天组($t(18) = -3.63$，$p = 0.002$，Cohen's $d = 0.83$)的离线巩固效应显著低于 0，且两组之间无显著差异($t(40) = -0.11$，$p = 0.911$)。

4.2.4 意识性评估

采用零相关标准进一步检验了被试的知识意识性状态，5 名被试由于判断全错在后续统计中被剔除(晚上组 2 人，白天组 3 人)。结果发现，两组被试在判断正确和错误的试次上，信心值差异均不显著，(晚上组 $t(20) = 0.82$，$p = 0.423$)、白天组 $t(15) = -0.42$，$p = 0.677$)，表明被试不存在外显的知识。

4.3 讨论

实验三采用更为简单、长度为 4 的序列规则，进一步考察了睡眠对纯粹的知觉序列内隐习得离线巩固的影响。结果发现被试可以内隐习得纯粹的知觉序列，但无论晚上组还是白天组均没有表现出离线巩固效应，与实验一结果相同。与实验一、二相比，实验三中知觉组(16ms)的学习效应有所提高，

但是与实验一(67ms)、二(39ms)中动作组的学习效应仍有较大的差异。

5 总讨论

本研究采用 Rose 等人(2011)改进的序列反应时任务，在完全分离知觉序列和动作序列的情况下，通过三个实验操纵不同复杂程度的序列规则，系统考察了睡眠对纯粹的知觉序列和动作序列内隐习得离线巩固的影响。结果发现，睡眠是否参与内隐习得序列知识的离线巩固过程，受到序列类型(动作 vs. 知觉)以及序列复杂程度的影响。具体来说，对于动作序列，序列复杂程度较低(序列长度为 6)时，无论是否经过睡眠都会发生离线巩固效应(实验一)，而对于较为复杂的动作序列规则(序列长度为 11)，只有经历睡眠才会引起离线巩固效应的发生(实验二)；对于知觉序列，无论何种难易程度，均未发生离线巩固效应(实验一、二、三)。

本研究发现，在动作序列内隐学习的离线巩固中，相对于简单的序列，复杂的序列更容易从睡眠中获益，表现出基于睡眠的离线巩固效应。这与既往外显动作序列基于睡眠离线巩固的研究发现相一致：只有序列较长且结构复杂时，睡眠才表现出对离线巩固的促进(Blischke & Malangré, 2016, 2017; Genzel et al., 2012; Malangré et al., 2014)。在动作序列的内隐学习研究中，Ertelt 等人(2012)采用较为复杂的双任务范式(dual-task paradigm)，设置较长且结构复杂的序列规则(例如：231432413421)，也发现了睡眠对内隐习得序列的离线巩固有促进作用。而 Borragán 等人(2015)采用相对简单的触屏动作序列(在该任务中刺激位置为屏幕的四个角，序列规则构成的路径形状较为简单)，发现不管是睡眠状态还是剥夺睡眠状态下内隐习得知识都有相似的离线巩固效应。综上表明，睡眠对复杂动作序列的离线巩固具有促进作用。这可能是由于简单序列结构的学习不像复杂序列能够主动从系统整合过程中获得更多，限制了后续整合过程中离线巩固的增强效果(Blischke & Malangré, 2017)。此外，一些研究还发现，睡眠能够促进人类独有的复杂的认知学习(Stickgold, 2005)。然而，何种复杂程度或长度的动作序列才会存在基于睡眠的离线巩固效应，这种离线巩固发生在睡眠的哪个阶段，以及为什么这种离线巩固只发生在睡眠阶段等问题，还有待进一步探索。

在本研究中，无论何种序列难度，是否有睡眠，均未发现纯粹知觉序列内隐习得的离线巩固效应。Kemeny 和 Lukacs(2016)指出学习的效果会影响离线巩固效应，学习效果越小，离线巩固效应越小。在实验一中，知觉组第一阶段的序列学习效应较小(11ms)且显著低于动作组(67ms)。尽管在实验三中，为了提高知觉序列的内隐学习成绩，使用了更加简单的序列任务，但被试在第一阶段的序列学习成绩仍未有大幅度的提高(晚上组：17ms；白天组：14ms)。因此，知觉组不存在离线巩固可能与知觉序列的序列学习效应过小有关。然而，梳理既往关于纯粹知觉序列的内隐学习研究发现，被试的学习效应基本都介于 10～20ms 之间(Gheysen et al., 2011; Rose et al., 2011)。这可能是由于跟动作序列相比，按

键反应不能直接的体现知觉序列的学习效应有关。后续研究可以采用更加直接、敏感的测量方式进一步探讨纯粹知觉序列的离线巩固效应。此外，学习时长以及序列组块的分布顺序也可能是影响知觉序列学习效应的因素，后续研究也可以通过增加学习时长来尝试提升被试的学习效应。

值得注意的是，除睡眠之外，时间间隔也是影响离线巩固效应的重要因素之一(Albouy et al., 2006; Albouy et al., 2008; Hallgató et al., 2013; Schalkwijk et al., 2019)。对离线巩固时间进程的研究表明，学习阶段后存在一个关键期，这对于记忆痕迹保持稳定或提高是必需的，且因学习任务的不同，其关键时期的长度也不尽相同(Robertson et al., 2005; Walker et al., 2003)。例如，Press 等人(2005)采用标准的 SRT 任务探讨了内隐动作序列学习离线巩固的时间进程。结果发现，被试在学习 4 个小时后表现出离线巩固效应，而且其巩固效应随离线间隔的增加表现出递增的趋势。后续研究采用类似的学习任务进一步发现，在离线 12 小时，甚至更长的时间后(24 小时，一周或一年)，动作序列的离线巩固效应仍然存在(Meier & Cock, 2014; Nemeth & Janacsek, 2011; Romano et al., 2010)。而在 Albouy 等人(2006)的研究中，研究者采用序列眼动反应时任务(serial oculomotor reaction time task, SORT)，通过记录眼动反应时发现，被试在学习后 30 分钟就表现出了离线巩固效应，但在间隔 5 小时后该效应消失。在该研究中，被试不需要做出手指按键反应，因此只存在眼动/知觉序列学习(Vakil et al., 2021)。类似的，采用时间辨别任务(temporal discrimination task)的研究也发现，知觉学习早在间隔 5 分钟后就表现出离线巩固效应(Bratzke et al., 2014)。上述研究结果表明，相对于动作序列，知觉序列内隐知识的离线巩固可能是一个更快的过程。鉴于此，在本研究中纯粹的知觉序列不存在离线巩固，还可能是因为间隔时间太长，学习效应得到离线巩固之后又发生了衰退有关。后续研究可以通过设计不同时间间隔后的睡眠与觉醒条件，进一步探讨纯粹的知觉序列和动作序列基于睡眠的离线巩固效应具体发生的时间点，以及它们离线巩固的动态轨迹。

与既往外显学习研究结果相一致，本研究也发现了睡眠对知觉序列和动作序列知识离线巩固影响的分离效应。与外显学习不同的是，我们发现相对于简单的动作序列，睡眠促进了复杂的动作序列的离线巩固效应，而知觉序列则没有表现出离线巩固效应。不过，值得注意的是，在既往分离知觉与动作序列的外显学习研究中并未引入序列难度这一变量，所以提升序列难度之后睡眠对外显序列学习离线巩固的影响尚不清楚。King 等人(2017)认为序列学习中存在某些特定特征(例如：空间信息、顺序信息、情景信息等)会影响睡眠在序列知识记忆巩固过程中的作用，且该作用的发挥依赖于海马系统的再激活过程。另外一些研究者认为睡眠对序列学习离线巩固的积极作用与离线过程中与学习相关的脑区(例如，海马、楔叶、前运动皮层、辅助运动区和纹状体等)的重新激活有关(Maquet et al., 2000; Peigneux et al., 2003; Urbain et al., 2013)。鉴于此，为了更好的厘清序列知识类型、睡眠以及内隐外显

学习方式三者间的关系，后续研究可以借助 ERP 以及 fMRI 等技术进一步从神经机制层面探讨睡眠对序列学习离线巩固的影响。

再者，在本研究中，昼夜节律也是一个不可忽视的因素，以往的研究发现许多技能和认知处理受到昼夜节律的影响(Cajochen et al., 2004; May et al., 2005)。在本研究中，白天组和晚上组的被试对于知觉和动作序列的学习效应在第一阶段并不存在差异，表明被试虽然在一天内不同的时间进行学习，但对学习效果并没有影响；而且，在考察睡眠对序列学习离线巩固的研究中，设计白天组和晚上组是一个经典的做法(Hallgató et al., 2013; Sanchez-Mora & Tamayo, 2021; Vakil et al., 2021)。过去也有研究者通过控制可能的时间效应，试图区分睡眠和昼夜节律因素，以此探讨睡眠在离线巩固中的作用，但没有得到一致性的结论(Cajochen et al., 2004; Keisler et al., 2007; Tucker et al., 2017)，在后续研究中可以通过有无小睡的方式来进一步探讨睡眠对序列学习的影响。

本研究结果可以为现实生活中复杂动作信息的内隐学习提供某些方法上的启示。比如学习乐器，掌握运动中的协调动作以及复杂的语音发音等，都可以考虑通过适当安排睡前练习等方法来改善学习效果。

6 结论

本研究采用改进的序列反应时任务，探讨了睡眠对纯粹的知觉序列和动作序列内隐学习离线巩固的影响，结果发现睡眠是否会促进内隐习得序列知识的离线巩固过程，受到序列类型(动作 vs. 知觉)以及序列复杂程度的影响。在动作序列内隐学习的离线巩固中，相对于结构简单的序列，结构复杂的序列更容易从睡眠中获益。对于知觉序列，无论何种难易程度，都未发生离线巩固效应。

参考文献

Albouy, G., Fogel, S., King, B. R., Laventure, S., Benali, H., Karni, A., . . . Doyon, J. (2015). Maintaining vs. enhancing motor sequence memories: respective roles of striatal and hippocampal systems. *Neuroimage, 108*, 423 – 434.

Albouy, G., Fogel, S., Pottiez, H., Nguyen, V. A., Ray, L., Lungu, O., . . . Doyon, J. (2013). Daytime sleep enhances consolidation of the spatial but not motoric representation of motor sequence memory. *PLoS One*, *8*(1), e52805.

Albouy, G., Ruby, P., Phillips, C., Luxen, A., Peigneux, P., & Maquet, P. (2006). Implicit oculomotor sequence learning in humans: Time course of offline processing. *Brain Research*, *1090*(1), 163–171.

Albouy, G., Sterpenich, V., Balteau, E., Vandewalle, G., Desseilles, M., Dang-Vu, T., . . . Maquet, P. (2008). Both the hippocampus and striatum are involved in consolidation of motor sequence memory. *Neuron*, *58*(2), 261–272.

Backhaus, W., Braass, H., Renne, T., Kruger, C., Gerloff, C., & Hummel, F. C. (2016). Daytime sleep has no effect on the time course of motor sequence and visuomotor adaptation learning. *Neurobiology of Learning and Memory, 131*, 147–154.

Barham, M. P., Lum, J. A. G., Conduit, R., Fernadez, L., Enticott, P. G., & Clark, G. M. (2021). A Daytime Nap Does Not Enhance the Retention of a First-Order or Second-Order Motor Sequence. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, *15*, 659281.

Blischke, K., & Malangré, A. (2016). Chunk concatenation evolves with practice and sleep-related enhancement consolidation in a complex arm movement sequence. *Journal of Human Kinetics*, *51*(1), 5–17.

Blischke, K., & Malangré, A. (2017). Task Complexity Modulates Sleep-Related Offline Learning in Sequential Motor Skills. *Frontiers in Human Neuroscience*, *11*, 374.

Borragán, G., Urbain, C., Schmitz, R., Mary, A., & Peigneux, P. (2015). Sleep and memory consolidation: motor performance and proactive interference effects in sequence learning. *Brain & Cognition*, *95*, 54–61.

Bratzke, D., Schroter, H., & Ulrich, R. (2014). The role of consolidation for perceptual learning in temporal discrimination within and across modalities. *Acta Psychologica, 147*, 75–79.

Brawn, T. P., Fenn, K. M., Nusbaum, H. C., & Margoliash, D. (2010). Consolidating the effects of waking and sleep on motor-sequence learning. *Journal of Neuroscience*, *30*(42), 13977–13982.

Buysse, D. J., Reynolds, C. F. III., Monk, T. H., Berman, S. R., & Kupfer, D. J. (1989). The Pittsburgh Sleep Quality Index: A New Instrument for Psychiatric Practice and Research. *Psychiatry Research*, *28*(2), 193–213.

Cajochen, C., Knoblauch, V., Wirz-Justice, A., Krauchi, K., Graw, P., & Wallach, D. (2004). Circadian modulation of sequence learning under high and low sleep pressure conditions. *Behavioural Brain Research*, *151*(1-2), 167–176.

Deroost, N., & Coomans, D. (2018). Is sequence awareness mandatory for perceptual sequence learning: An assessment using a pure perceptual sequence learning design. *Acta Psychologica*, *183*, 58–65.

Deroost, N., & Soetens, E. (2006). Perceptual or motor learning in SRT tasks with complex sequence structures. *Psychological Research*, *70*(2), 88–102.

Dienes, Z., Altmann, G., Kwan, L., & Goode, A. (1995). Unconscious knowledge of artificial grammars is applied strategically. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition, 21*(5), 1322–1338.

Dienes, Z., & Berry, D. (1997). Implicit learning: Below the subjective threshold. *Psychonomic Bulletin & Review, 4*(1), 3–23.

Dienes, Z., & Perner, J. (1999). Atheory of implicit and explicit knowledge. *Behavioural and Brain Sciences, 22,* 735–755.

Dienes, Z., & Seth, A. K. (2010). Measuring any conscious content versus measuring the relevant conscious content: comment on Sandberg et al. *Consciousness and Cognition*, *19*(4), 1079–1080.

Ertelt, D., Witt, K., Reetz, K., Frank, W., Junghanns, K., Backhaus, J., . . . Binkofski, F. (2012). Skill memory escaping from distraction by sleep--evidence from dual-task performance. *PLoS One*, *7*(12), e50983.

Ferdinand, N. K., & Kray, J. (2017). Does language help regularity learning? The influence of verbalizations on implicit sequential regularity learning and the emergence of explicit knowledge in children, younger and older adults. *Developmental Psychology*, *53*(3), 597–610.

Genzel, L., Quack, A., Jager, E., Konrad, B., Steiger, A., & Dresler, M. (2012). Complex motor sequence skills profit from sleep. *Neuropsychobiology*, *66*(4), 237–243.

Gheysen, F., Van Opstal, F., Roggeman, C., Van Waelvelde, H., & Fias, W. (2011). The neural basis of implicit perceptual sequence learning. *Frontiers in Human Neuroscience*, *5*(137), 1–12.

Guo, X., Jiang, S., Wang, H., Zhu, L., Tang, J., Dienes, Z., & Yang, Z. (2013). Unconsciously learning task-irrelevant perceptual sequences. *Consciousness and Cognition*, *22*(1), 203–211.

Guo X. Y., Jiang S., Ling X. L., Zhu L., & Tang J. H. (2011) Specific Contribution of Intuition to Implicit Learning Superiority. *Acta Psychologica Sinica*, 43(9), 977–982.

[郭秀艳, 姜珊, 凌晓丽, 朱磊, 唐菁华. (2011). 直觉对内隐学习优势效应的特异性贡献. *心理学报*, *43*(9), 977–982.]

Guo, X. Y. (Ed). (2003). *Implicit learning*. Shanghai, China: East China Normal University Press.

[郭秀艳. (主编). (2003). 内隐学习. *上海: 华东师范大学出版社*.]

Guo, X. Y., & Yang, Z. L. (2002). Research on interrelation of implicit and explicit learning. *Acta Psychologica Sinica*, *34*(4), 351–356.

[郭秀艳, 杨治良. (2002). 内隐学习与外显学习的相互关系. *心理学报*, *34*(4), 351–356.]

Hallgató, E., Gyori-Dani, D., Pekar, J., Janacsek, K., & Nemeth, D. (2013). The differential consolidation of perceptual and motor learning in skill acquisition. *Cortex*, *49*(4), 1073 – 1081.

Horne, J. A., & Ostberg, O. (1976). A self-assessment questionnaire to determine morningness-eveningness in human circadian rhythms. *International Journal of Chronobiology*, *4*(2), 97–110.

Janacsek, K., & Nemeth, D. (2012). Predicting the future: from implicit learning to consolidation. *International Journal of Psychophysiology*, *83*(2), 213–221.

Jiang, S. (2012). *Implicit Learning of Chinese Tonal Regularity* (Unpublished doctorial dissertation). East China Normal University, Shanghai.

[姜珊. (2012). 汉语声调规则的内隐学习 (博士学位论文). *华东师范大学, 上海*.]

Karni, A., Meyer, G., Jezzard, P., Adams, M. M., Turner, R., & Ungerleider, L. G. (1995). Functional MRI evidence for adult motor cortex plasticity during motor skill learning. *Nature*, *377*(6545), 155–158.

Karni, A., Meyer, G., Rey-Hipolito, C., Jezzard, P., Adams, M. M., Turner, R., & Ungerleider, L. G. (1998). The acquisition of skilled motor performance: fast and slow experience driven changes in primary motor cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America.*, *95*(3), 861–868.

Karni, A., & Sagi, D. (1993). The time course of learning a visual skill. *Nature*, *365*(6443), 250–252.

Karni, A., Tanne, D., Rubenstein, B. S., Askenasy, J. J., & Sagi, D. (1994). Dependence on REM sleep of overnight improvement of a perceptual skill. *Science*, *265*(5172), 679–682.

Keisler, A., Ashe, J., & Willingham, D. T. (2007). Time of day accounts for overnight improvement in sequence learning. *Learning & Memory*, *14*(10), 669–672.

Kemeny, F., & Lukacs, A. (2016). Sleep-independent off-line enhancement and time of the day effects in three forms of skill learning. *Cognitive Processing*, *17*(2), 163–174.

Kempler, L., & Richmond, J. L. (2012). Effect of sleep on gross motor memory. *Memory*, *20*(8), 907–914.

King, B. R., Hoedlmoser, K., Hirschauer, F., Dolfen, N., & Albouy, G. (2017). Sleeping on the motor engram: The multifaceted nature of sleep-related motor memory consolidation. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, *80*, 1–22.

Li, F., Guo, X., Zhu, L., Yang, Z., & Dienes, Z. (2013). Implicit learning of mappings between forms and metaphorical meanings. *Consciousness and Cognition*, *22*(1), 174–183.

Li, F. F. (2013). *Implicit Learning of Chinese Tonal Symmetry Rules and the Neural Network Simulations* (Unpublished doctorial dissertation). East China Normal University, Shanghai.

[李菲菲. (2013). 汉语声调对称规则的内隐学习及神经网络模拟研究 (博士学位论文). *华东师范大学, 上海*]

Ling, X., Guo, X., Zheng, L., Li, L., Chen, M., Wang, Q., . . . Dienes, Z. (2015). The neural basis of implicit learning of task-

irrelevant Chinese tonal sequence. *Experimental Brain Research*, *233*(4), 1125–1136.

Lutz, N. D., Wolf, I., Hubner, S., Born, J., & Rauss, K. (2018). Sleep Strengthens Predictive Sequence Coding. *Journal of Neuroscience*, *38*(42), 8989–9000.

Malangré, A., & Blischke, K. (2016). Sleep-Related Offline Improvements in Gross Motor Task Performance Occur Under Free Recall Requirements. *Frontiers in Human Neuroscience, 10*, 134.

Malangré, A., Leinen, P., & Blischke, K. (2014). Sleep-related offline learning in a complex arm movement sequence. *Journal of Human Kinetics*, *40*(1), 7–20.

Maquet, P., Laureys, S., Peigneux, P., Fuchs, S., Petiau, C., Phillips, C., . . . Meulemans, T. (2000). Experience-dependent changes in cerebral activation during human REM sleep. *Nature Neuroscience*, *3*(8), 831–836.

May, C. P., Hasher, L., & Foong, N. (2005). Implicit memory, age, and time of day: paradoxical priming effects. *Psychological Science*, *16*(2), 96–100.

Mealor, A. D., & Dienes, Z. (2012). Conscious and unconscious thought in artificial grammar learning. *Consciousness and Cognition*, *21*(2), 865–874.

Meier, B., & Cock, J. (2014). Offline consolidation in implicit sequence learning. *Cortex*, *57*, 156–166.

Nemeth, D., & Janacsek, K. (2011). The dynamics of implicit skill consolidation in young and elderly adults. The journals of gerontology. *Journals of Gerontology - Series B Psychological Sciences and Social Sciences*, *66*(1), 15–22.

Nemeth, D., Janacsek, K., Londe, Z., Ullman, M. T., Howard, D. V., & Howard, J. H. (2010). Sleep has no critical role in implicit motor sequence learning in young and old adults. *Experimental Brain Research*, *201*(2), 351–358.

Nettersheim, A., Hallschmid, M., Born, J., & Diekelmann, S. (2015). The role of sleep in motor sequence consolidation: stabilization rather than enhancement. *Journal of Neuroscience*, *35*(17), 6696–6702.

Nissen, M. J., & Bullemer, P. (1987). Attentional requirements of learning: Evidence from performance measures. *Cognitive Psychology*, *19*(1), 1–32.

Pace-Schott, E. F., & Spencer, R. M. (2013). Age-related changes in consolidation of perceptual and muscle-based learning of motor skills. *Frontiers in Aging Neuroscience, 5*, 83.

Peigneux, P., Laureys, S., Fuchs, S., Collette, F., Perrin, F., Reggers, J., . . . Maquet, P. (2004). Are spatial memories strengthened in the human hippocampus during slow wave sleep? *Neuron, 44*(3), 535–545.

Peigneux, P., Laureys, S., Fuchs, S., Destrebecqz, A., Collette, F., Delbeuck, X., . . . Degueldre, C. (2003). Learned material content and acquisition level modulate cerebral reactivation during posttraining rapid-eye-movements sleep. *Neuroimage*, *20*(1), 125–134.

Press, D. Z., Casement, M. D., Pascual-Leone, A., & Robertson, E. M. (2005). The time course of off-line motor sequence learning. *Cognitive Brain Research, 25*(1), 375–378.

Reber, A. S. (1967). Implicit learning of artificial grammars. *Journal of Verbal Learning & Verbal Behavior*, *6*(6), 855–863.

Remillard, G. (2003). Pure perceptual-based sequence learning. *Journal of Experimental Psychology Learning Memory & Cognition*, *29*(4), 581–597.

Robertson, E. M. (2009). From creation to consolidation: a novel framework for memory processing. *Plos Biology*, *7*(1), 11－19.

Robertson, E. M., Pascual-Leone, A., & Press, D. Z. (2004). Awareness modifies the skill-learning benefits of sleep. *Current Biology*, *14*(3), 208–212.

Robertson, E. M., Press, D. Z., & Pascual-Leone, A. (2005). Off-line learning and the primary motor cortex. *Journal of Neuroscience*, *25*(27), 6372–6378.

Romano, J. C., Howard, J. H., Jr., & Howard, D. V. (2010). One-year retention of general and sequence-specific skills in a probabilistic, serial reaction time task. *Memory, 18*(4), 427–441

Rose, M., Haider, H., Salari, N., & Buchel, C. (2011). Functional dissociation of hippocampal mechanism during implicit learning based on the domain of associations. *Journal of Neuroscience*, *31*(39), 13739–13745.

Sanchez-Mora, J., & Tamayo, R. M. (2021). From incidental learning to explicit memory: The role of sleep after exposure to a

serial reaction time task. *Acta Psychologica*, *217*, 103325.

Schalkwijk, F. V., Sauter, C., Hoedlmoser, K., Heib, D., Klosch, G., Moser, D., . . . Schabus, M. (2019). The effect of daytime napping and full-night sleep on the consolidation of declarative and procedural information. *Journal of Sleep Research*, *28*(1), 1–9.

Simor, P., Zavecz, Z., Horvath, K., Elteto, N., Torok, C., Pesthy, O., . . . Nemeth, D. (2019). Deconstructing Procedural Memory: Different Learning Trajectories and Consolidation of Sequence and Statistical Learning. *Frontiers in Psychology*, *9*, 2708.

Song, S. (2009). Consciousness and the consolidation of motor learning. *Behavioural Brain Research*, *196*(2), 180–186.

Song, S., Howard, J. H., & Howard, D. V. (2007). Sleep does not benefit probabilistic motor sequence learning. *Journal of Neuroscience*, *27*(46), 12475–12483.

Spencer, R. M., Sunm, M., & Ivry, R. B. (2006). Sleep-dependent consolidation of contextual learning. *Current Biology, 16*(10), 1001–1005.

Spencer, R. M., Sunm, M., & Ivry, R. B. (2007). Age-related decline of sleep-dependent consolidation. *Learning & Memory*, *14*(7), 480–484.

Stickgold, R. (2005). Sleep-dependent memory consolidation. *Nature*, *437*(7063), 1272–1278.

Tucker, M. A., Morris, C. J., Morgan, A., Yang, J., Myers, S., Pierce, J. G., . . . Scheer, F. J. L. (2017). The Relative Impact of Sleep and Circadian Drive on Motor Skill Acquisition and Memory Consolidation. *Sleep*, *40*(4), PII zsx036.

Urbain, C., Schmitz, R., Schmidt, C., Cleeremans, A., Van Bogaert, P., Maquet, P., & Peigneux, P. (2013). Sleep-dependent neurophysiological processes in implicit sequence learning. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *25*(11), 2003–2014.

Vakil, E., Hayout, M., Maler, M., & Ashkenazi, S. S. (2021). Day versus night consolidation of implicit sequence learning using manual and oculomotor activation versions of the serial reaction time task: reaction time and anticipation measures. *Psychological Research, 86*(3)*,* 983-1000.

Walker, M. P., Brakefield, T., Hobson, J. A., & Stickgold, R. (2003). Dissociable stages of human memory consolidation and reconsolidation. *Nature*, *425*(6958), 614–620.

Witt, K., Margraf, N., Bieber, C., Born, J., & Deuschl, G. (2010). Sleep consolidates the effector-independent representation of a motor skill. *Neuroscience, 171*(1), 227–234.

Sleep and the consolidation of perceptual and motor sequences in implicit learning

SUN Peng[1], LI Xueqing[2], ZHANG Qingyun[3], SHANG Huaiqian[3], LING Xiaoli[3]

([1] *Mental Health Education and Research Center, Shandong University of Finance and Economics, Jinan,* 250014*, China*)

([2] *School of Humanities and Social Science, Beijing Institute of Technology, Beijing,* 100081*, China*)

([3] *School of Psychology, Shandong Normal University, Jinan,* 250358*, China*)

ABSTRACT

Implicit learning is integral to human cognition. It occurs during the learning phase (online periods) and the offline interval after the learning phase (offline periods). The process during the offline periods is referred to as consolidation, which means stabilization or enhancement of a memory trace even without additional practice after the initial acquisition. Some studies have preliminarily explored the effect of sleep on the consolidation of perceptual and motor sequences in implicit learning. However, these studies have failed to achieve a complete separation of motor sequences and perceptual sequences, thus leaving open the question of whether the sequence type moderates the effects of sleep on the consolidation of implicit sequence learning. In addition, previous studies of explicit learning have found that sequences with long length and high complexity were more likely to benefit from sleep than simple sequences, showing a sleep-based offline consolidation effect. Therefore, the question of whether the effect of sleep on offline consolidation of implicit learning of perceptual and motor sequences is moderated by sequence complexity remains unresolved.

The present study addressed these issues through three experiments applying different sequence length levels and complexities using a modified version of the Serial Reaction Time (SRT) task, which allows independent manipulation of perceptual and motor sequences. Participants were instructed to press the corresponding key as quickly and accurately as possible according to which color of the target square was the same as that of the surrounding square. In the perceptual sequence group, the target square color followed a sequence, but the finger response orders were randomly assigned. The opposite was true for the motor sequence group. Subsequently, a prediction test was used to estimate the amount of possible explicit knowledge.

Experiment 1 used a short six-element sequence with lower complexity and showed a more robust offline consolidation effect in the motor sequence group compared to the perceptual sequence group. However, sleep does not promote the offline consolidation of both sequences. In Experiment 2, a more complex sequence (sequence length 11) was used. The results showed that participants implicitly learned the motor sequence. In the motor sequence group, participants with sleep performed a better offline consolidation effect than those without sleep. However, participants neither implicitly acquired the sequence nor showed an offline consolidation effect in the perceptual sequence group. Participants performed a small perceptual sequence learning effect in Experiment 1 or 2. Based on this result, the sleep-related offline consolidation of the perceptual sequence was further examined using a more simple sequence of length 4 in Experiment 3. The results showed that participants exhibited improvements in the performance of perceptual sequences learning,

but no offline consolidation effect was observed in either group.

The combined results of the three experiments showed that sleep does not promote the offline consolidation of perceptual sequences, regardless of the degree of difficulty. For motor sequences, the sequence learning effect significantly increased following sleep but not after waking when the sequence length was long and structural complexity was high. However, sleep-related offline improvements were absent when the sequence length was short. In conclusion, these results indicated that the offline consolidation of implicit sequence knowledge based on sleep is modulated by sequence type and sequence complexity.

Keywords sleep, implicit learning, perceptual sequences, motor sequences, offline consolidation